

# **ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.4.9)**

УДК 621.039.743

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-111-121

## **Математическое моделирование теплогидравлических процессов, протекающих в хранилищах отработавшего ядерного топлива сухого типа**

Н.Э. Кайсенов, О.И. Мелихов, Е.Н. Казакова, А.О. Веселов, М.М. Каверзnev, М.Е. Буду, С.С. Селькин, Т.Ф. Макарчук, М.Е. Черданцев, И.Н. Триполец

Разработана расчетная CFD-модель, позволяющая определять скалярные значения температуры и векторные значения скорости воздуха в здании хранилища отработавшего ядерного топлива (ХОЯТ) проекта ВВЭР-1200. Рассчитанные значения обосновывают безопасную эксплуатацию транспортных упаковочных комплектов (ТУК) с отработавшим ядерным топливом, размещенных в ХОЯТ, подтверждают корректность принятых в проекте ХОЯТ конструктивных и технологических решений, обеспечивающих необходимый запас прочности и надежности, без выполнения дорогостоящих полномасштабных или макетных экспериментов.

*Ключевые слова:* отработавшее ядерное топливо, транспортный упаковочный комплект, теплогидравлика, гидроаэродинамика, естественные теплообмен и вентиляция, аэрация, хранилище отработавшего ядерного топлива, математическое моделирование физических процессов.

*Для цитирования:* Кайсенов Н.Э., Мелихов О.И., Казакова Е.Н., Веселов А.О., Каверзнев М.М., Буду М.Е., Селькин С.С., Макарчук Т.Ф., Черданцев М.Е., Триполец И.Н. Математическое моделирование теплогидравлических процессов, протекающих в хранилищах отработавшего ядерного топлива сухого типа // Вестник МЭИ. 2023. № 5. С. 111—121. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-111-121.

## **Mathematical Modeling of Thermal-hydraulic Processes in Dry Type Spent Nuclear Fuel Storages**

N.E. Kaisenov, O.I. Melikhov, E.N. Kazakova, A.O. Veselov, M.M. Kaverznev, M.E. Budu, S.S. Sel'kin, T.F. Makarchuk, M.E. Cherdantsev, I.N. Tripolets

A computational CFD model has been developed that makes it possible to determine the scalar values of temperature and vector values of air velocity in the spent nuclear fuel storage (SNFS) at an NPP of the VVER-1200 conceptual design. The calculated values serve as a basis to substantiate safe operation of transport packaging casks (TPCs) with spent nuclear fuel placed in the SNFS and confirm the adequacy of the structural and process solutions adopted in the SNFS design, which ensure the necessary safety and reliability margins without the need to perform expensive full-scale or mock-up experiments.

*Key words:* spent nuclear fuel, transport packaging cask, thermal hydraulics, fluid dynamics, natural heat transfer, natural ventilation, aeration, spent nuclear fuel storage, mathematical modeling of physical processes.

*For citation:* Kaisenov N.E., Melikhov O.I., Kazakova E.N., Veselov A.O., Kaverznev M.M., Budu M.E., Sel'kin S.S., Makarchuk T.F., Cherdantsev M.E., Tripolets I.N. Mathematical Modeling of Thermal-hydraulic Processes in Dry Type Spent Nuclear Fuel Storages. Bulletin of MPEI. 2023;5:111—121. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-111-121.

## Введение

В разных странах применяют различные технологии обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО). В настоящее время в мире реализуются как переработка ОЯТ и РАО, так и глубинное захоронение, а также принято большое количество так называемых отложенных решений, подразумевающих временное размещение ОЯТ и РАО до принятия решений о переработке или захоронении [1]. Прорабатываются различные проекты обращения с ОЯТ и РАО, в которых главную роль играет обоснование безопасности. Одним из практических инструментов, позволяющих обоснованно доказывать корректность проектных решений объектов использования атомной энергии, являются инструменты математического моделирования физических процессов.

Цель исследований — оценка влияния воздействия окружающей среды на параметры воздуха в зоне размещения ТУК с ОЯТ в отдельном здании — хранилище сухого типа ХОЯТ со схемой отведения избытков теплоты от ТУК методом аэрации (схемой вентиляции с естественным побуждением).

Требования о таком проектном решении устанавливается техническим заданием на разработку проекта АЭС зарубежными заказчиками. Схема естественного побуждения определена в соответствии с концепцией использования двухцелевого ТУК (транспортирование и хранение) с установленной для него 3-й категорией размещения согласно ГОСТ 15150—69 «Машины, приборы и другие технические изделия».

Оценка теплового баланса воздуха в здании ХОЯТ позволяет определить пределы и условия безопасной эксплуатации ТУК в ХОЯТ в соответствии с требованиями НП-001-15 и НП-061-05 в части обеспечения температуры оболочки тепловыделяющих элементов не более 350 °C. Косвенным критерием безопасности при обосновании проектных решений может служить температура внешней поверхности ТУК.

На тепловой баланс воздуха в ХОЯТ влияют следующие факторы:

- объемно-планировочные, конструктивные, архитектурные и инженерные решения (геометрия здания, его ориентация по сторонам солнечного света, конструкции фасадов, приемных и выбросных устройств воздуха систем вентиляции и др.);
- величина тепловыделения от ТУК;
- влияние солнечной радиации (инсоляции);
- ветровые воздействия.

Для оценки влияния указанных факторов в программном обеспечении Star-CCM+ разработана расчетная CFD-модель ХОЯТ, позволившая не только получить расчетные физические зависимости, характеризующие обозначенные факторы, но также установить и устранить проектные недостатки здания ХОЯТ, избежать необходимости натурных экспериментов, не допустить проектных ошибок на этапе реализации проекта ХОЯТ и конструировании ТУК.

## Методология разработки расчетной модели

Разработка модели состояла из трех этапов. Необходимость такого подхода обусловлена стадиями определения исходных данных, необходимых как для проектирования здания, так и конструирования оборудования. Для проектировщика при создании ХОЯТ требуется информация о параметрах окружающей среды: температуре и влажности воздуха, скорости и розе ветров и некоторых других данных, являющихся граничными условиями для расчетов, а также ориентировочных сведениях эксплуатируемого в нем оборудования (габаритах, тепловыделении). В свою очередь, конструктору ТУК для конструирования оборудования нужны параметры воздуха в ХОЯТ. Таким образом, задача обоснования безопасной эксплуатации ТУК в ХОЯТ становится итерационной, где проектировщик в начальной итерации устанавливает исходные технические требования к оборудованию (ИТТ), включающие в себя параметры воздуха в области размещения ТУК, а в следующей итерации конструктор ТУК, по результатам разработки конструкторской документации на основании ИТТ, предоставляет проектировщику конструкторские данные для уточнения проекта ХОЯТ и создания рабочей документации для строительства.

### Этап 1.

На первом этапе разработана грубая расчетная CFD-модель и в первом приближении определены:

- зависимости расхода воздуха через проемы здания при заданной температуре окружающей среды;
- распределения температуры и давления;
- линии тока потока воздуха.

Выполненные гидродинамические расчеты установили характер течений потока воздуха, застойные зоны, градиент температуры воздуха по высоте здания. ТУК моделировали объемным источником, ограниченным цилиндрической областью высотой 5 м и диаметром 2.5 м. Внешнее обтекание здания на этом этапе не моделировалось. Количество ТУК — 60 шт.

### Этап 2.

На втором этапе модель первого этапа была дополнена внешней расчетной областью для оценки внешнего течения (приток-отток воздуха), уточнены физическая модель и расчетная сетка. Габариты источника тепла изменены: высота цилиндрической области увеличена до 6,2 м. Данное изменение включено в модель ввиду появления актуализированных исходных данных для проектирования от конструктора ТУК. Модель воздуха (азотно-кислородная смесь) дополнена водяным паром для учета влажности воздуха. Количество ТУК — 60 шт.

### Этап 3.

На третьем этапе были дополнительно смоделированы козырьки на внешней части контурных стен здания и перекрытиях. Для учета процессов теплопроводности в стенах здания внешние и внутренние

границы стен заменены расчетной областью твердого тела со свойствами бетона, также добавлен отдельный слой тепловой изоляции на кровле здания. Модель ТУК второго этапа заменена тепловым эквивалентом ТУК, представляющим собой толстостенный цилиндр с толщиной стенки — 110 мм, внешним диаметром — 2,5 м и высотой — 4 м, заменяющим центральную часть ТУК — область оребрения. тепло распределено в объеме теплового эквивалента. У остальных элементов ТУК (нижняя и верхняя части — область крышки) физические свойства отсутствуют. Такие элементы (основание ТУК, крышка и др.) имеют граничные условия непроницаемой преграды и в теплообмене не участвуют.

Таким образом, результирующая модель третьего этапа состоит из пяти расчетных областей: окружающей среды, тепловой изоляции, стен, внутренней расчетной области, теплового эквивалента. Количество ТУК уменьшено с 60 до 40 шт.

### Построение расчетной модели

На первом этапе построена трехмерная модель внутренней области ХОЯТ с размещенными в ней ТУК, включая проемы в наружных стенах и кровле (рис. 1). Здание разделено на зоны размещения ТУК и транспортного коридора. Зона размещения ТУК состоит из двух отсеков, отделенных друг от друга стеной, предназначенной для размещения опор крановых путей.

В зоне размещения ТУК внутренний воздух нагревается от поступлений теплоты с поверхности ТУК за счет остаточного тепловыделения размещенных в них отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС). По мере роста температуры нагретые слои воздуха поднимаются вверх. Вместе с этим происходят диффузия нагретых воздушных масс и потеря напора.

В целях недопущения затекания воздушной ударной волны (ВУВ) в здание ХОЯТ в проемах здания предусмотрены специальные устройства перекрытия вентиляционных каналов (УПВК). При воздействии ВУВ определённой интенсивности УПВК закрываются и не допускают затекание ВУВ внутрь здания. УПВК требует регулярного обслуживания, при необходимости

соответствующего ремонта и имеют аэродинамические сопротивления, подлежащие учету в расчетах (коэффициент аэродинамического сопротивления УПВК  $C_x \approx 4\dots6$ ).

Для рассматриваемой задачи с учетом рекомендаций [2], а также опыта других исследователей [3 — 5], использованы осредненные по Рейнольду определяющие уравнения движения (RANS-модель) с  $k-\epsilon$ -моделью турбулентности. Для расчетов тепловой конвекции рассмотрены два метода моделирования: с использованием приближения Буссинеска—Обербека, предполагающего неизменность свойств воздуха, взятых для неизменной температуры и с учетом изменения свойств воздуха от температуры. Выявленные в ходе анализа модели Буссинеска—Обербека погрешности оказались незначительными (менее 3%), однако с учетом аналитических исследований [6] и некоторого влияния на скорость расчета в дальнейших этапах моделирования использован второй метод.

Для построения расчетной сетки взят встроенный генератор расчетных сеток StarCCM+. Базовый размер ячейки определен на основании анализа сеточной погрешности. Итоговый базовый размер ячейки всех этапов выставлен с учетом сеточной погрешности не более 5%. Сеточную сходимость оценивали путем уменьшения базового размера ячейки. В ходе оценки сеточной погрешности выполнены расчеты с использованием расчетной сетки размером от 1 до 15 млн ячеек для модели первого и второго, для модели третьего этапа — от 7 до 30 млн ячеек.

На рисунке 2 изображен разрез здания с элементами расчетной сетки расчетных моделей трех этапов (сверху вниз).

Сравнительный анализ сеток, разработанных на трех этапах, представлен в табл. 1.

Для оценки корректности граничных условий моделировали как прямую, так и обратную постановки задачи. Для воссоздания реальных условий в качестве граничных условий прямой постановки задачи на проемах задавали условие избыточного давления, равного 0 Па (отсутствие превышения давления над атмосферным), а для проверки, в качестве обратной постанов-

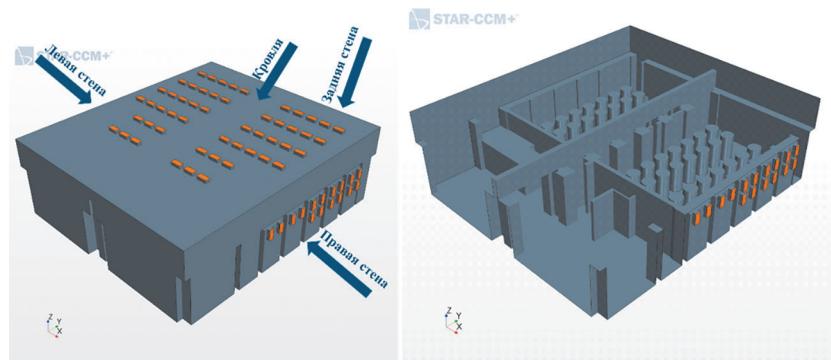


Рис. 1. Трехмерная модель геометрии здания ХОЯТ (первый этап)

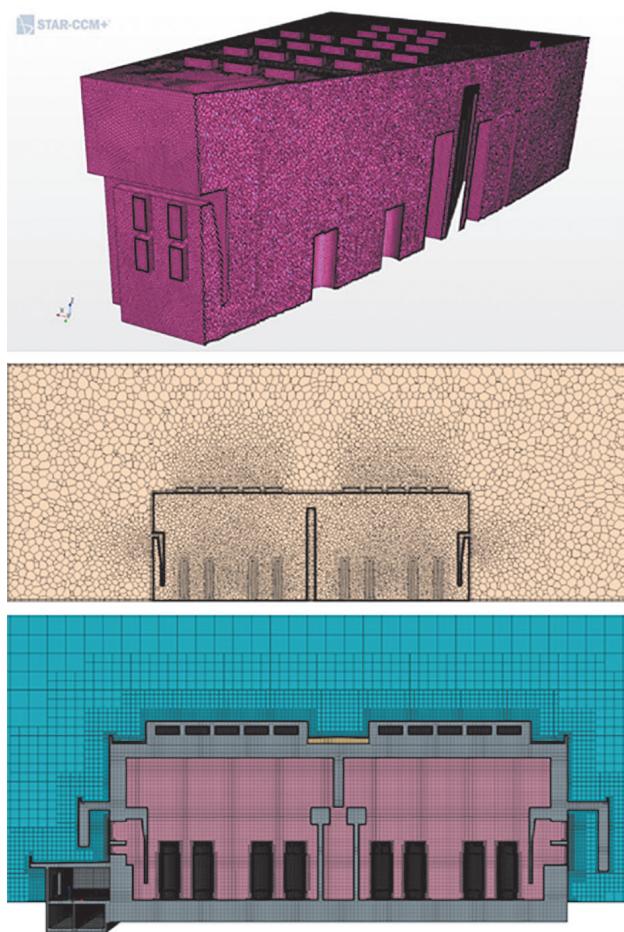


Рис. 2. Расчетная сетка первого, второго и третьего этапов (сверху вниз)

ки, — полученные в прямой постановке значения расхода воздуха в проемах. Погрешность прямой и обратной задач — незначительна (менее 1%).

В соответствии с [2], для моделирования сопротивлений проемов, возникающих из-за установки решеток фасадов и иного оборудования, и материалов, создающих аэродинамические сопротивления, использована модель пористой среды.

### Результаты выполненных расчетов

#### Исходные данные расчетов по моделям первого и второго этапов

Атмосферное давление, Па	101325
Температура окружающего воздуха, °C	50,4
Тепловыделение от одного контейнера, кВт	21,6
Количество контейнеров, шт.	60
Суммарное тепловыделение, кВт	1296
Аэродинамические сопротивления проемов	6

Результаты инженерного анализа с помощью расчетной модели первого этапа представлены ниже. В таблице 2 приведены средние расходы и направления поступающего/ухудшающего воздуха через проемы ХОЯТ. Расположение стен указано на рис. 1.

На рисунках 3 — 6 даны распределения температуры, линий тока воздуха и давления.

Разработка инженерной модели первого этапа позволила оценить расход воздуха в проемах здания, получить распределения температур и давления в здании ХОЯТ, определить линии тока скорости движения воздуха в сжатые сроки для формирования исходных данных для конструкторов ТУК.

Таблица 1

#### Сравнительный анализ расчетных сеток трех этапов

Первый этап	Второй этап	Третий этап
Сетка — 8,4 млн узлов с базовым размером ячейки 0,2 м. Построена внутренняя расчетная область. Для пристенных областей установлена двухслойная призматическая модель с размером слоя 33% от базового размера ячейки.	Сетка — 4 млн узлов. Добавлена расчетная область окружающего ХОЯТ пространства в удалении на 15 м от стен с боковыми проемами и 20 м — от кровли. Базовый размер сетки, по сравнению с первым этапом, остался неизменным. Расчетная область стала больше, однако, благодаря сгущению/разрежению сетки (скорости роста), итоговый размер сетки был уменьшен. Для пристенных областей установлена двухслойная призматическая модель с размером слоя 33% от базового размера ячейки.	Сетка — 17 млн узлов. Базовый размер сетки увеличен до 0,25 м. Для построения внешней расчетной сетки использован цилиндр диаметром 500 м и высотой 300 м. Ось цилиндра установлена в геометрическом центре здания. Контейнер выделен в отдельную расчетную область для возможности учета поправок точности моделирования обрежения в последующих дополнительных обоснованиях.

Таблица 2

#### Средний расход воздуха по сечениям проемов здания

Характеристика	Наименование строительной конструкции (проемы)			
	Левая стена	Правая стена	Задняя стена	Кровля
Расход, м <sup>3</sup> /ч	+83163	+81675	+121194	-286031

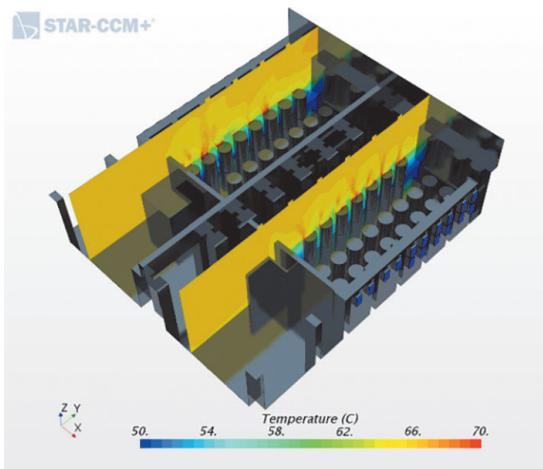


Рис. 3. Распределение температуры в продольных сечениях здания ХОYT (расчетная модель первого этапа)

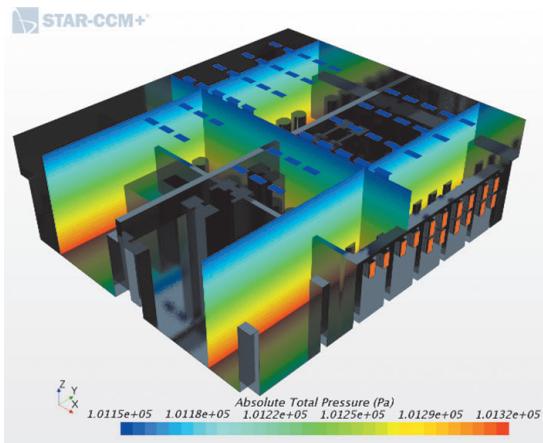


Рис. 4. Распределение давления в продольных сечениях здания ХОYT (расчетная модель первого этапа)

Результаты расчета с помощью модели, разработанной на втором этапе, приведены в табл. 3.

Модель второго этапа не учитывала теплообмен окружающей среды со стенами и воздействие солнечной радиации. По результатам расчетов по модели второго этапа распределения температуры, давления и линии тока воздуха качественно не отличаются от распределений, полученных на первом этапе, однако модель второго этапа не позволила оценить влияние солнечной инсоляции на тепловой баланс воздуха здания ХОYT, а также корректно учесть влияние ветровой нагрузки. Для этого потребовалась разработка модели третьего этапа.

#### Исходные данные расчета по модели третьего этапа

Атмосферное давление, Па .....	101325
Температура окружающего воздуха, °C .....	32,9; 44,2; 50,4
Ветровая нагрузка, м/c (направление ветра показано на рис. 7).....	2,3; 27,3; 46,8
Тепловыделение от одного контейнера, кВт .....	21,6
Количество контейнеров, шт.....	40
Суммарное тепловыделение, кВт .....	864
Аэродинамические сопротивления проемов, $C_x$ .....	6

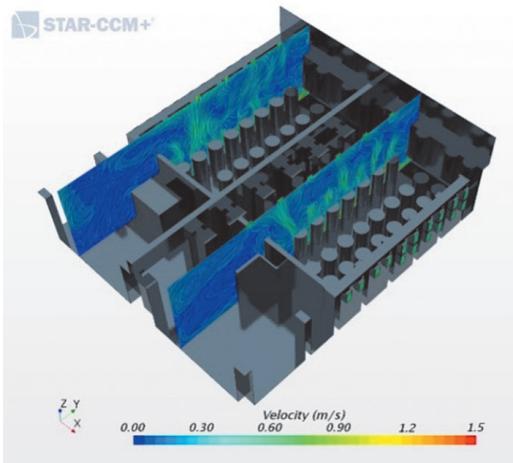


Рис. 5. Линии тока в продольных сечениях здания ХОYT (расчетная модель первого этапа)

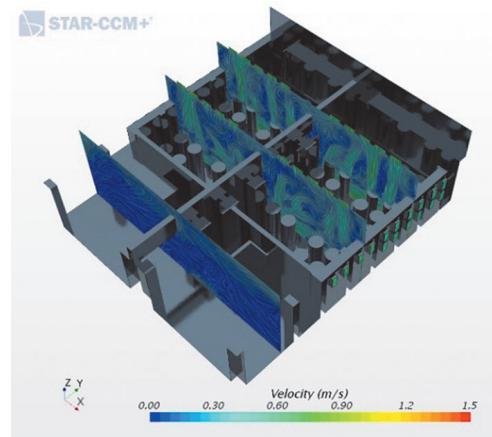


Рис. 6. Линии тока в поперечных сечениях здания ХОYT (расчетная модель первого этапа)

Ветровые воздействия, в частности 27,3 и 46,8 м/с, не были длительными. Приведенные значения предусмотрены проектными изысканиями для оценки прочности фасадных систем и иных элементов внешних строительных конструкций, однако ввиду большой площади проемов они также использованы в расчетах теплового баланса здания ХОYT в качестве подтверждения устойчивости расчетной модели.

На рисунке 7 продемонстрированы линии тока скорости при внешнем обтекании здания ХОYT в горизонтальном разрезе на высоте 6 м.

Характерное сечение (фиолетовый цвет) для оценки распределения температуры, давления и линий тока скорости приведено на рис. 8 модели третьего этапа. Распределения линий тока и температуры изображены на рис. 9 — 12.

На рисунках 10 — 12 даны распределения температуры воздуха в характерном сечении при скорости окружающего ветра 2,3 м/с.

На рисунках 13, 14 представлены графики зависимости температуры на отметке обслуживания 6 м и

Таблица 3

**Средний расход поступающего и выходящего из ХОЯТ воздуха**

Характеристика	Наименование строительной конструкции (проемы)			
	Левая стена	Правая стена	Задняя стена	Кровля
Расход, м <sup>3</sup> /ч	+75933	+75933	+108078	-257685

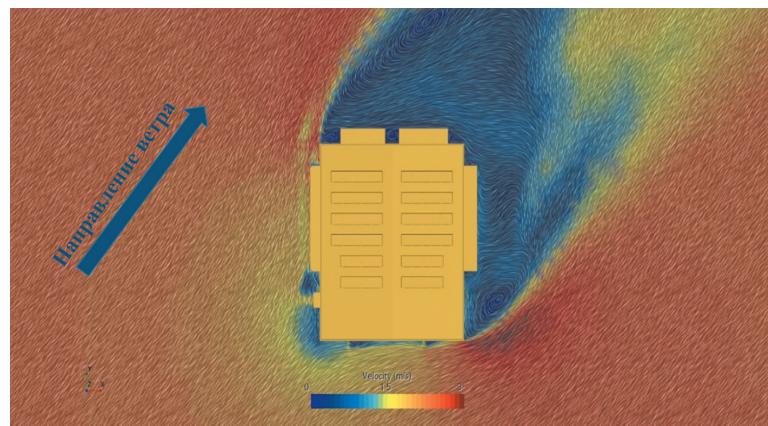


Рис. 7. Линии тока (минимальная скорость — 0 м/с, максимальная — 3 м/с) при внешнем обтекании здания ХОЯТ в горизонтальном разрезе на высоте 6 м модели третьего этапа

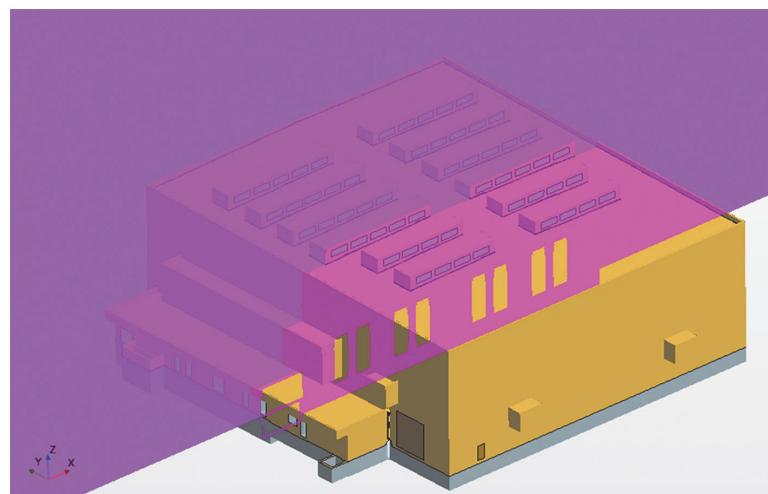


Рис. 8. Характерное сечение

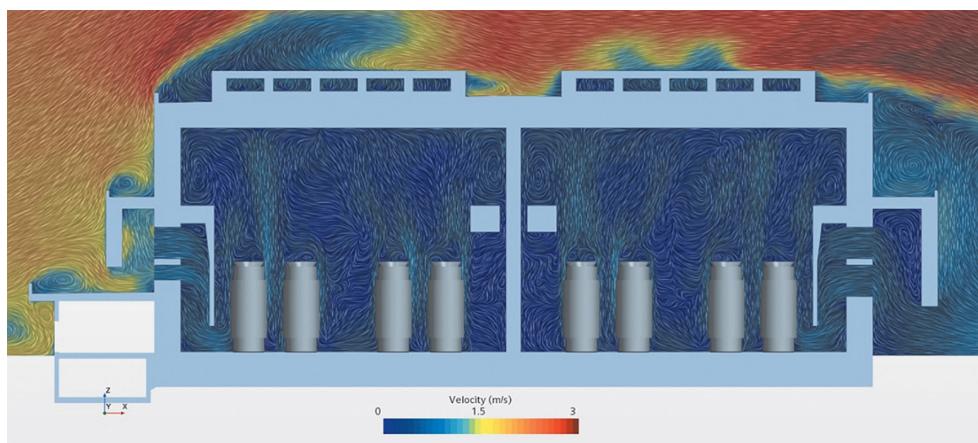


Рис. 9. Распределение линий тока скорости (минимальная скорость — 0 м/с, максимальная — 3 м/с) в характерном сечении (модель третьего этапа)

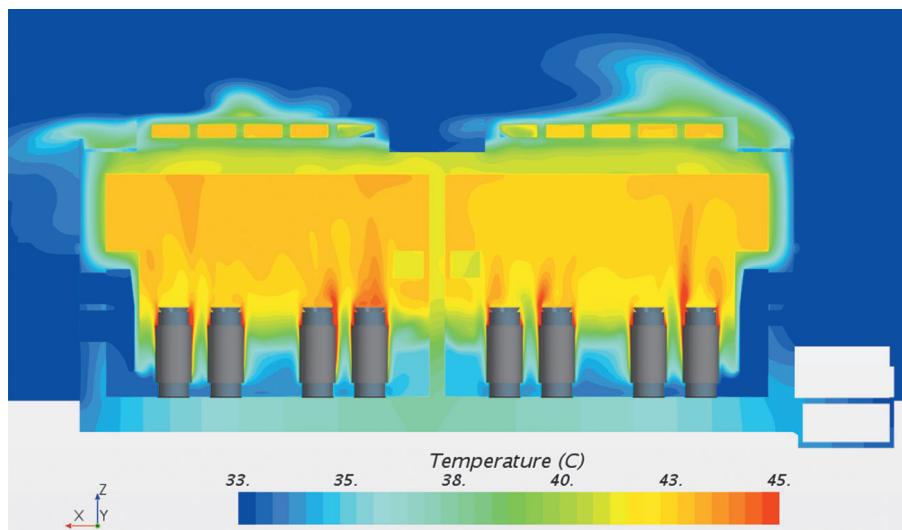


Рис. 10. Распределение температуры в здании ХОЯТ при температуре окружающего воздуха 32,9 °C в характерном сечении (модель третьего этапа)

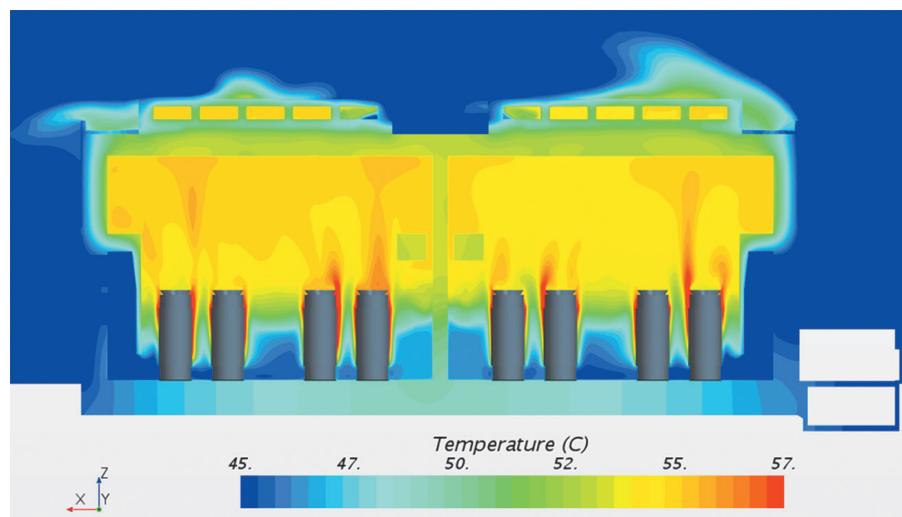


Рис. 11. Распределение температуры в здании ХОЯТ при температуре окружающего воздуха 44,2 °C в характерном сечении (модель третьего этапа)

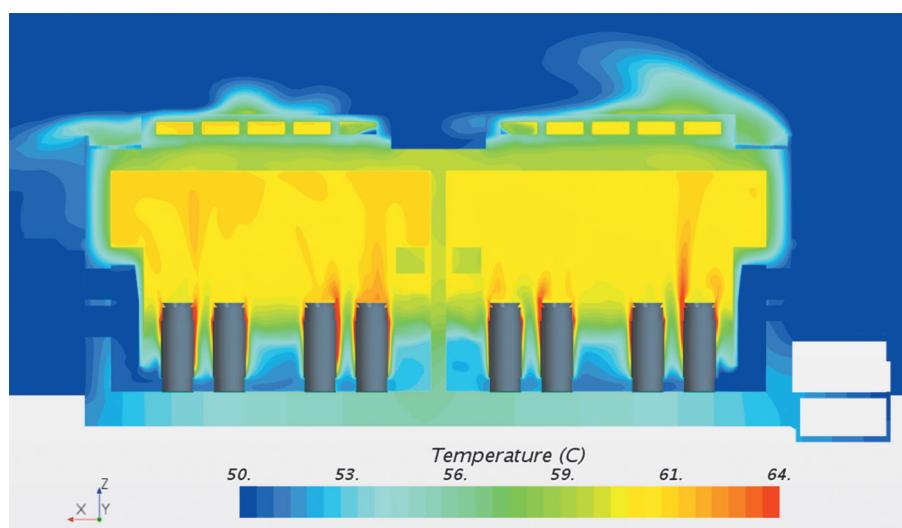


Рис. 12. Распределение температуры в здании ХОЯТ при температуре окружающего воздуха 50,4 °C в характерном сечении (модель третьего этапа)

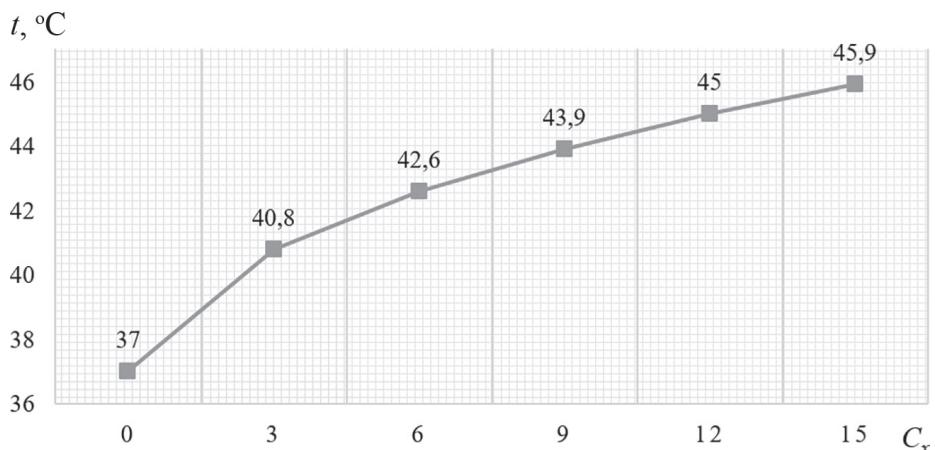


Рис. 13. График зависимости температуры на отметке обслуживания ТУК 6 м от аэродинамических сопротивлений проемов расчетной модели третьего этапа. Суммарное тепловыделение от ТУК — 864 кВт, скорость ветра — 2,3 м/с, температура окружающего воздуха — 32,9 °C

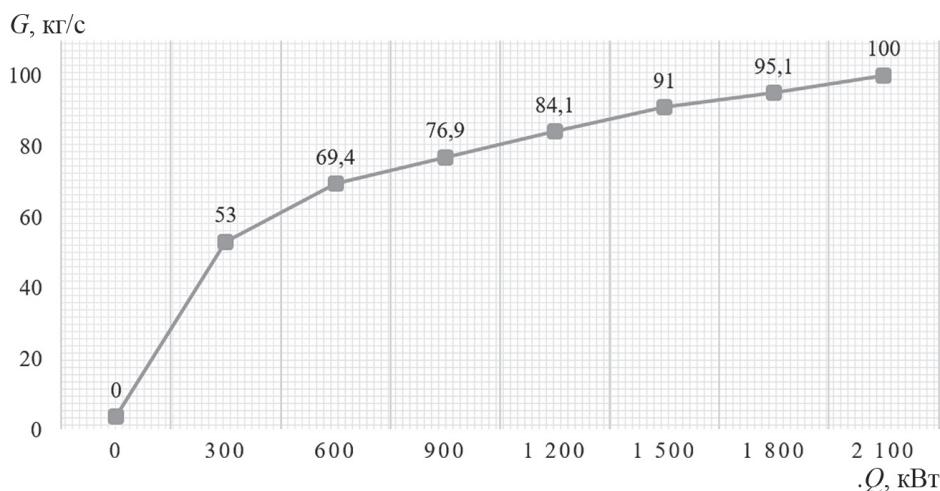


Рис. 14. График расхода воздуха через проемы здания ХОЯТ в зависимости от аэродинамических сопротивлений проемов расчетной модели третьего этапа. Аэродинамические сопротивления проемов — 6, скорость ветра — 2,3 м/с, температура окружающего воздуха — 50,4 °C

расхода воздуха от аэродинамических сопротивлений проемов здания ХОЯТ при температуре окружающего воздуха 32,9 °C, количестве ТУК — 40 шт., с тепловыделением 21,6 кВт от одного ТУК.

Интересно сопоставить зависимости температуры воздуха на отметке обслуживания ТУК 6 м, расхода воздуха в проемах от тепловыделения ТУК для моделей трех этапов для исходных данных табл. 2. Указанные зависимости продемонстрированы на рис. 15, 16.

### Выводы

Исходя из полученных зависимостей температуры на отметке обслуживания 6 м и расхода воздуха в проемах здания от аэродинамического сопротивления (см. рис. 13), можно сделать вывод о том, что аэродинамические сопротивления проемов, обусловленные наличием оборудования (УПВК, фасадных решеток, элементов систем физической защиты) оказывают значительное влияние на расход поступающего и уходящего

воздуха. Изменение расхода в диапазоне значений сопротивления от 0 до 6 составило более 40%.

Анализ полученных зависимостей температуры на отметке обслуживания 6 м и расхода воздуха в проемах здания от тепловыделения от ТУК для моделей трех этапов (см. рис. 9) показал, что в модели первого этапа значение расхода воздуха не является максимальным, при этом температура воздуха на отметке обслуживания 6 м максимальна среди моделей всех этапов. Очевидно, что модель первого этапа подходит только для грубой инженерной оценки зависимостей.

Зависимости модели второго и третьего этапов практически эквидистантны, что доказывает корректность и устойчивость расчетных моделей. Относительное отклонение значений в точках рассматриваемых зависимостей (см. рис. 15, 16) по температуре составила не более 5%, по расходу — не более 15%.

Для принятия проектных решений в части плана управления запроектными авариями ключевым является установление запаса времени для проведения

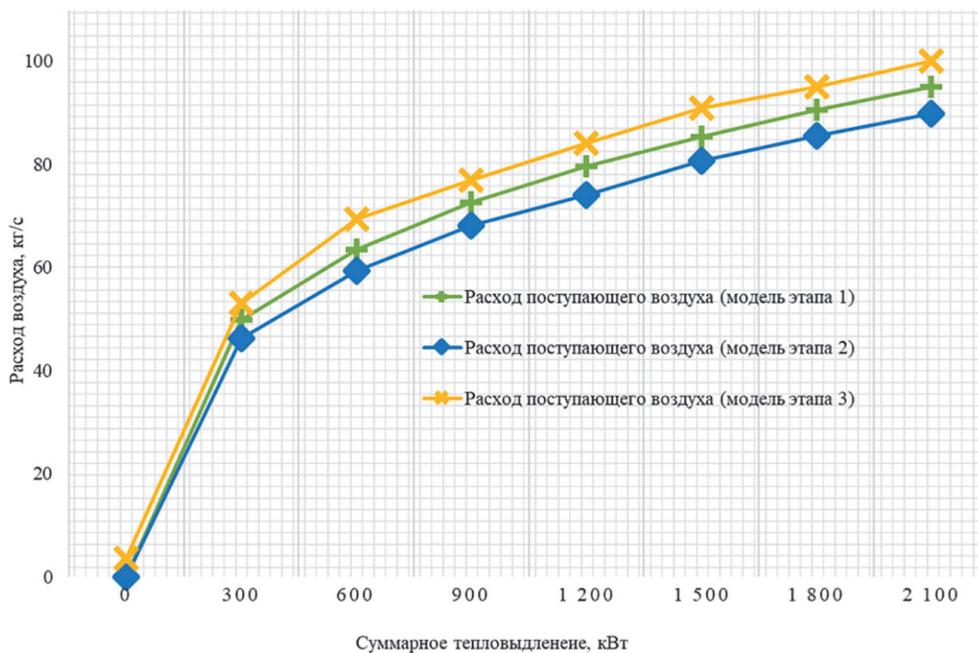


Рис. 15. Зависимость расхода воздуха через проемы от тепловыделения ТУК для расчетных моделей первого, второго и третьего этапов

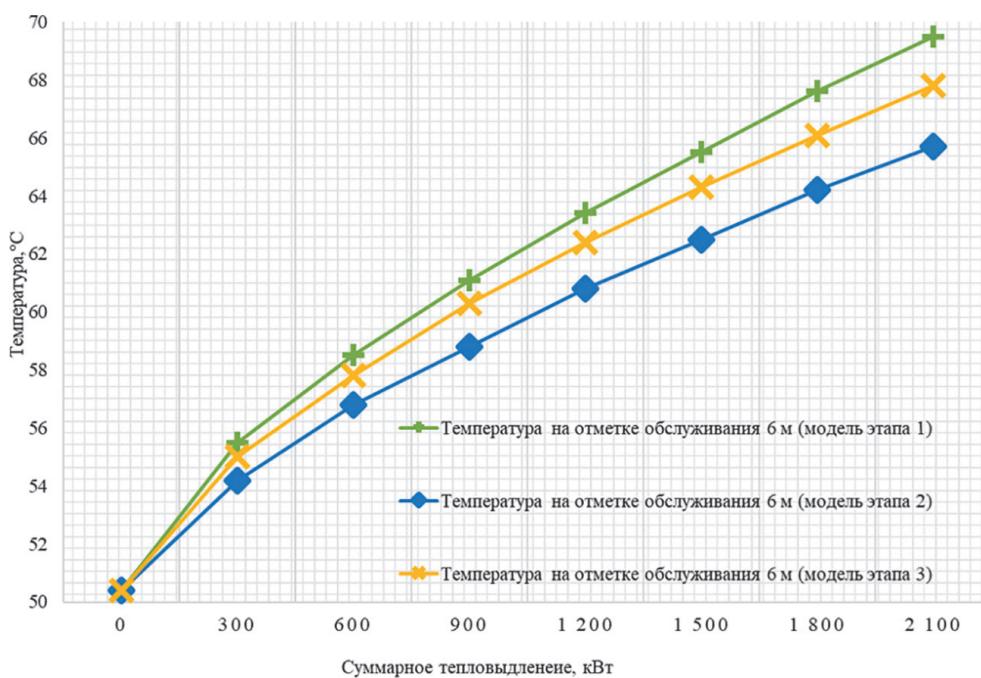


Рис. 16. Зависимость температуры на отметке обслуживания 6 м от тепловыделения ТУК для расчетных моделей первого, второго и третьего этапов

снижающих тяжесть аварии мероприятий. Постулируемым событием может стать завал здания грунтом. Разработанная модель третьего этапа позволяет сделать расчеты в нестационарной постановке для оценки динамики изменения температуры в ХОЯТ и ее влияния на критерии безопасности при эксплуатации ТУК в ХОЯТ в случае наступления постулируемого события.

Исчерпывающие результаты моделирования, в соответствии с исходными данными расчета третьего этапа, касающиеся воздействий природного характера (ветровой и солнечной активностей), а также оценки допущений моделей, связанных с граничными условиями источника тепла, являются предметом будущих исследований.

## Литература

1. **Обзор** зарубежных практик захоронения ОЯТ и ПАО. М.: Изд-во Комтехпринт, 2015.
2. **Guide U.** Star-CCM+ Version 12.04.17. Melville: CD-adapco, 2017.
3. **Suárez C. e. a.** Parametric Investigation Using Computational Fluid Dynamics of the HVAC Air Distribution in a Railway Vehicle for Representative Weather and Operating Conditions // Energies. V. 10(8). Pp. 1074—1087.
4. **Zuo W. e. a.** Coupled Simulation of Indoor Environment, HVAC and Control System by Using Fast Fluid Dynamics and the Modelica Buildings Library // Proc. ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conf. Atlanta, 2014. Pp. 56—63.
5. **Iizuka S. e. a.** Coupling Strategy of HVAC System Simulation and CFD Part 2: Study on Mixing Energy Loss in an Air-conditioned Room // Proc. Building Simulation 2011: XII Conf. Intern. Building Performance Simulation Association. Sydney, 2011. Pp. 2096—2101.
6. **Черкасов С.Г., Ананьев А.В., Моисеева Л.А.** Ограничения модели Буссинеска на примере ламинарной естественной конвекции газа между вертикальными изотермическими стенками // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 6. С. 961—967.

## References

1. **Obzor Zarubezhnykh Praktik Zakhoroneniya OYAT i RAO.** M.: Izd-vo Komtekhpriint, 2015. (in Russian).
2. **Guide U.** Star-CCM+ Version 12.04.17. Melville: CD-adapco, 2017.
3. **Suárez C. e. a.** Parametric Investigation Using Computational Fluid Dynamics of the HVAC Air Distribution in a Railway Vehicle for Representative Weather and Operating Conditions. Energies;10(8):1074—1087.
4. **Zuo W. e. a.** Coupled Simulation of Indoor Environment, HVAC and Control System by Using Fast Fluid Dynamics and the Modelica Buildings Library. Proc. ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conf. Atlanta, 2014:56—63.
5. **Iizuka S. e. a.** Soupling Strategy of HVAC System Simulation and CFD Part 2: Study on Mixing Energy Loss in an Air-conditioned Room. Proc. Building Simulation 2011: XII Conf. Intern. Building Performance Simulation Association. Sydney, 2011:2096—2101.
6. **Cherkasov S.G., Anan'ev A.V., Moiseeva L.A.** Ogranicheniya Modeli Bussineska na Primere Laminarnoy Estestvennoy Konvektsii Gaza Mezhdu Vertikal'nymi Izotermicheskimi Stenkami. Teplofizika Vysokikh Temperatur. 2018;56;6:961—967. (in Russian).

## Сведения об авторах:

**Кайсенов Никита Эдуардович** — аспирант кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ», АО «Русатом Энерго Интернешнл» (АО «РЭИН»), АО «Атомэнергопроект», e-mail: kaysenovnikita@gmail.com

**Мелихов Олег Игоревич** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

**Казакова Елена Николаевна** — заместитель начальника БКП-6 АО «Атомэнергопроект»

**Веселов Анатолий Олегович** — главный специалист БКП-6 АО «Атомэнергопроект»

**Каверзnev Mikhail Mihailovich** — кандидат технических наук, доцент кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

**Буду Мадалина-Елена** — советник департамента контейнерного обращения с ОЯТ и ВАО АО «Техснабэкспорт»

**Селькин Сергей Сергеевич** — главный специалист АО «ВНИИЭАС»

**Макарчук Татьяна Федоровна** — советник технического директора Akkuyu Nükleer A.Ş. (АО «Аккую Нуклеар»)

**Черданцев Михаил Егорович** — руководитель проекта Akkuyu Nükleer A.Ş. (АО «Аккую Нуклеар»)

**Триполец Ирина Николаевна** — заместитель генерального директора по стоимостному инжинирингу и проектированию АО «Русатом Энерго Интернешнл» (АО «РЭИН»)

## Information about authors:

**Kaisenov Nikita E.** — Ph.D.-student of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI, JSC «Rusatom Energy International» (JSC «REIN»), JSC «Atomenergoproekt», e-mail: kaysenovnikita@gmail.com

**Melikhov Oleg I.** — Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI

**Kazakova Elena N.** — Deputy Head of BCP-6, JSC «Atomenergoproekt»

**Veselov Anatoliy O.** — Chief Specialist of BCP-6, JSC «Atomenergoproekt»

**Kaverznev Mikhail M.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI

**Budu Madalina-Elena** — Advisor to the Department of Container Handling of SNF and VAO JSC «Techsnabexport»

**Sel'kin Sergey S.** — Chief Specialist of JSC «VNIEAS»

**Makarchuk Tatyana F.** — Advisor to the Technical Director, Akkuyu Nükleer A.Ş. (JSC «Akkuyu Nuclear»)

**Cherdantsev Mikhail E.** — Project Manager, Akkuyu Nükleer A.Ş. (JSC «Akkuyu Nuclear»)

**Tripolets Irina N.** — Deputy General Director for Cost Engineering and Design, JSC «Rusatom Energy International» (JSC «REIN»)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 13.03.2023

**The article received to the editor:** 13.03.2023

**Статья принята к публикации:** 06.06.2023

**The article has been accepted for publication:** 06.06.2023